# 机场跑道性能退化随机过程模型的贝叶斯数据更新方法

魏保立[1,2],郭成超[3],王复明[2],闫卫红[4]

(1. 郑州航空工业管理学院土木建筑学院,450046 郑州;2. 郑州大学水利科学与工程学院,450001 郑州;
3. 中山大学土木工程学院,519082 珠海;4. 河南省机场集团有限公司,450000 郑州)

**摘　要:**为了精确预测民用机场跑道的剩余使用寿命,利用数据融合技术将两种数据集进行联合分析,采用贝叶斯概率预测方法对机场跑道定期检测数据进行更新。考虑机场道面退化过程的随机性和动态性,建立了一种机场道面性能退化的动态半马尔可夫随机过程模型,利用生存分析对半马尔可夫过程模型的转移概率进行了估计。考虑飞行交通量和道面厚度的双重影响,采用某地方民用机场2007年~2017年的道面性能定期检测数据,分析了两种影响因素的作用。利用半马尔可夫过程模型的转移概率对某地方民用机场跑道性能退化过程进行了预测,并采用马尔可夫链蒙特卡洛(Markov Chain Monte Carlo,MCMC)模拟技术,基于贝叶斯统计分析方法,利用不定期检测数据得到的先验信息对半马尔可夫过程模型的转移概率进行了更新,将更新后的模型应用于民用机场跑道性能预测,并将预测结果和未更新的动态半马尔可夫过程模型预测结果进行了对比分析。结果表明,基于MCMC的贝叶斯分析方法能够融合定期和不定期检测数据确定动态半马尔可夫过程模型的参数先验信息,可以有效地更新机场跑道的性能预估模型,提高模型的预测精度。

**关键词:**机场跑道;性能退化;半马尔可夫过程;生存分析;贝叶斯分析

**中图分类号:**U461.216;V315.11　**文献标志码:**A

# Data updating method with Bayesian analysis for stochastic process model of performance degradation of airport runway

WEI Baoli[1,2],GUO Chengchao[3],WANG Fuming[2],YAN Weihong[4]

(1. School of Civil and Architecture,Zhengzhou University of Aeronautics,450046 Zhengzhou,China;
2. School of Water Conservancy and Environment,Zhengzhou University,450001 Zhengzhou,China;
3. School of Civil Engineering,Sun Yat-sen University,519082 Zhuhai,China;
4. Henan Airporl Group,Zhengzhou 450000,China)

**Abstract:** In order to accurately predict residual service life of civil airport runway,two data sets were analyzed by using the data fusion technology and joint estimation approach. The periodic test data of airport runways were updated with Bayesian probability prediction method with the irregularly nondestructive

**收稿日期:**2020-10-02　**修回日期:**2021-12-06

**基金项目:**河南省高等学校重点科研项目(No. 21B580008);河南省科技攻关项目(No. 182102310747);郑州新郑国际机场三期扩建工程技术研究项目(No. NFXQGZ-033)

**通信作者:**郭成超,教授。E-mail:guocc@zzu.edu.cn

**引用格式:**魏保立,郭成超,王复明,等. 机场跑道性能退化随机过程模型的贝叶斯数据更新方法[J]. 应用力学学报,2022,39(2):356-366.
WEI Baoli,GUO Chengchao,WANG Fuming,et al. Data updating method with Bayesian analysis for stochastic process model of performance degradation of airport runway[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(2):356-366.

testing data of runways. Considering the randomness and dynamics of airport pavement degradation, a dynamic semi-Markov stochastic process model of airport pavement performance degradation was established. The transition probability of the semi-Markov process model was estimated by using the Weibull function parameter model of survival analysis. In the process of building the model, the dual effects of flight traffic and pavement surface thickness were considered, and the measured pavement performance data set of local civil airports was adopted to analyze the influence of these two factors in Henan Province from 2007 to 2017. The performance degradation process of runways of the civil airport in Henan province was predicted by using the transition probability of the semi-Markov process model. The transition probability was updated by adopting the Bayesian statistical analysis method based on Markov Chain Monte Carlo (MCMC) simulation technology with Metropolis-Hasting (MH) sampling method, using a priori information obtained from the irregular detection data of the airport runway. Finally, the updated model is applied to predict the performance of the local civil airport runway in Henan Province. The results show that the Bayesian analysis method based on MCMC can fully integrate the regular and irregular detection data to determine the prior information of parameters of the dynamic semi-Markov process model, and can effectively update the performance prediction model of the airport runway and improve the prediction accuracy of the model.

**Key words**: airport runway; performance degradation; semi-Markov process; survival analysis; Bayesian analysis



机场道面性能状况一直都是机场设施运维部门最关注的问题,通过道面性能预测,可以对养护维修决策提供指导,有助于将道面性能维持在适当的水平,长期以来道面性能预测都是机场道面领域研究的重点。

自 2002 年以来,同济大学结合上海机场道面调查评价与管理的实践,在借鉴国外机场道面管理系统的基础上,开发建立了上海机场道面管理系统(SHAPMS)[1]。目前,国内的大型民航枢纽机场已经使用机场道面管理系统对机场土木工程设施进行检测、评价以及运营维护[2]。总体来说,国内道面管理系统在国内机场跑道养护、维修和管理中的应用越来越广泛。通过近 20 年的机场道面管理系统的应用,中国民航管理部门也积累了较多的数据资料[3-5],包括每 5 年对机场道面进行定期检测的数据、日常运维数据以及道面修缮和扩建数据等。目前虽然有研究人员[6-7]采用这些数据进行分析和统计,并对机场道面管理提供了一定的技术指导,但是相比于国内的路面管理系统的数据库来说,机场道面管理系统数据库的利用率仍然处于较低水平。

国外应用路面管理系统较早,建立了适用各自管理系统的模型,包括线性外推模型、“S”型曲线模型、约束多项式模型[8]等。而应用于机场道面使用性能预测中最具代表性的经验模型为 PAVER 道面管理系统模型,Shahin 等[9]在道面状况指数(pavement condition index,PCI)基础上建立和发展了基于“道面族”方法的回归模型,该模型以 PCI 为预测指标,以多项式作为函数形式,通过最小二乘法进行参数估计。

相比经验模型而言,力学模型[10]具有明确的理论基础,为了兼顾力学和经验方法的优点,近年来,越来越多的学者倾向于力学-经验模型。1995 年 FAA 提出以累积疲劳损伤原理、弹性层状体系理论和通行-覆盖率为基础,针对新一代大型飞机的道面设计方法,并以该设计方法的逆过程作为道面结构剩余寿命的预估模型[11],该模型是机场道面力学-经验模型的典型代表。同济大学借鉴设计过程逆转的思想,在我国机场道面设计规范的基础上,建立了我国机场刚性道面结构剩余寿命的预估模型[12],并在国内多个民用机场的结构评价中应用和验证。

道面性状的预测有很大的不确定性,确定型模型无法解决此问题,所以目前不少铺面管理系统应用概率方法开发了道面性状预测模型。概率型预测模型包括残存曲线概率模型[13]、贝叶斯概率模型[14]、半马尔可夫概率模型[15]和马尔可夫概率模型[16],其中应用最广泛、最完善的是马尔可夫模型。

由于机场道面实施监测的成本较高,目前机场道面系统数据库中检测数据占比较大。这些检测数

据中隐藏着大量信息,因此有必要对这些信息进行数据挖掘,并融合新检测数据对原有数据进行分析,获取有用信息,以指导道面运维和管理。因此,本研究以国内机场道面性能评估方法为基础,从某民航机场定期检测数据中提取样本,建立机场道面性能预测模型,为机场跑道养护决策提供技术支持,同时也为机场管理部门合理地分配运维资金提供参考。

## 1 机场跑道性能退化模型的建立

### 1.1 半马尔可夫过程模型

在机场道面性能退化的过程中,如果机场道面区域的未来状况依赖于道面区域的当前状况,则该随机过程满足马尔可夫性。由于道面性能衰减过程中状态和时间都是连续变量,因此,在应用马尔可夫预测模型时常做一些规定[17]。机场道面退化过程其状态持续时间具有明显的半马尔可夫性[18]。因此,本研究利用半马尔可夫模型分析机场道面退化的随机过程。

道面性能退化的半马尔可夫预测模型建立步骤如下。

1)选择道面状况指数 PCI(0~100)作为预测指标,划分指标状态空间。将道面 PCI 离散为由优、良、中、次、差 5 个状态组成的状态空间。设任意时刻 $t$ 道面性能状况处于各种状态的概率分布为 $X(t)$,概率转移的观测周期以年为单位。过程的初始时刻记为 $t_0$,则道面性能的初始分布向量为 $\boldsymbol{X}(t_0)=(a_{01},a_{02},\cdots,a_{05})$, $\sum_i a_{0i}=1$ 。

2)建立半马尔可夫转移概率矩阵。半马尔可夫链主要通过转移概率矩阵预测道面性能随时间的衰变过程。假设在日常维修养护条件下,道面使用性能由低水平状态向高水平状态转移的情况不会发生。即当 $i>j$ 时 $p_{ij}=0$;则转移矩阵可表示为

$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} \\ 0 & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} \\ 0 & 0 & p_{33} & p_{34} & p_{35} \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & p_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{55} \end{bmatrix} \tag{1}$$

3)在实际预测过程中,考虑到半马尔可夫链的无后效性,由 Chapman-Kolmogorov 等式可得到由 $t_0$ 时刻状态到任意 $t$ 时刻状态的转移矩阵 $\boldsymbol{P}(t)$ 如式(2)所示。根据初始状态的概率向量 $\boldsymbol{X}(0)$,则半马尔可夫预测模型可写为 $\boldsymbol{X}(t)=\boldsymbol{X}(0)\boldsymbol{P}(t)$。

$$\boldsymbol{P}(t)=\begin{bmatrix} p_{11}(t) & p_{12}(t) & p_{13}(t) & p_{14}(t) & p_{15}(t) \\ 0 & p_{22}(t) & p_{23}(t) & p_{24}(t) & p_{25}(t) \\ 0 & 0 & p_{33}(t) & p_{34}(t) & p_{35}(t) \\ 0 & 0 & 0 & p_{44}(t) & p_{45}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{55}(t) \end{bmatrix} \tag{2}$$

### 1.2 转移概率的计算方法

对道面性能退化过程的参数模型进行估计,可以计算半马尔可夫过程的转移概率。一般情况下,离散状态退化模型的特征是:某一状态的转移概率在一个检查周期 $\Delta$(1 年或 2 年)内为保持不变。在时刻 $t$ 道面性能状态等级变量 $Y_t=1$ 的条件下,下一时刻 $t+\Delta$ 观测到道面性能状态等级变量 $Y_t=0$ 的概率是条件概率,用 $R(t,\Delta)$ 表示,可以由式(3)计算,式(3)中 Prob( · )表示概率,$T$ 表示时间变量。

$$\begin{aligned} R(t,\Delta) &= \mathrm{Prob}(t<T<t+\Delta \mid T>t) \\ &= \frac{\mathrm{Prob}(t<T<t+\Delta)}{\mathrm{Prob}(T>t)} \end{aligned} \tag{3}$$

$R(t,\Delta)$ 可以用生存分析[19]分布函数 $F(t)=P(T\leqslant t)$ 或生存函数 $S(t)=P(T>t)$ 计算。

依据生存分析理论可以得到

$$S(t)=1-F(t)=1-\int_0^t f(t)\,\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中 $f(t)$ 为随机变量 $t$ 的概率密度函数。

可以使用各种不同的概率分布来描述失效概率,威布尔分布函数比较适合描述土木工程结构的失效概率[17]。因此,本研究利用威布尔分布概率密度函数计算生存函数 $S(t)$。威布尔分布概率密度函数可以定义为

$$f(t_i|p,\lambda)=\lambda p(\lambda t_i)^{p-1}\exp(-(\lambda t_i)^p) \tag{5}$$

式中 $p$、$\lambda$ 为威布尔分布函数的参数。

$t$ 时刻的瞬时失效概率可以用危险率函数 $\lambda(t)$ 表示,即

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{S(t)}=\lambda p(\lambda t)^{p-1}=p\lambda^p t^{p-1} \tag{6}$$

机场跑道的性能退化是多种因素(比如设计特性、飞机交通荷载、使用环境、使用年限和维修历史等)综合作用的结果,因此可以用一组影响因素(或解释变量)对跑道的性能退化过程进行解释。通过对式(6)引入解释变量,可以将其转化为包含待估参数的形式,为了保证危险率函数的非负性,采用指

数函数引入解释变量，即

$$\lambda = e^{-\beta X} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{X}$ 为外生解释变量列向量（其中常数项对应分量值 1）；$\boldsymbol{\beta}$ 为待估参数行向量。

将式（7）代入式（6），并进行积分可以得

$$\Lambda(t) = (\lambda t)^p \tag{8}$$

进而可以得到生存函数 $S(t)$ 的表达式，即

$$S(t) = \exp\left(-(\lambda t)^p\right) \tag{9}$$

根据式（3）和式（9）可以得到在任何时刻 $t$，经过一段时间 $\Delta$ 从状态 $i$ 转移到低一级状态 $k$ 的概率 $p_{ik}(t,\Delta)$，即

$$p_{ik}(t,\Delta) = R(t,\Delta) = \frac{\text{Prob}(t < T < t+\Delta)}{\text{Prob}(T > t)} = \frac{F_i(t+\Delta) - F_i(t)}{1 - F_i(t)} = \frac{F_i(t+\Delta) - F_i(t)}{S_i(t)} \tag{10}$$

式中：$F_i(t)$ 为在状态 $i$ 的持续时间变量 $t$ 的累积分布函数；$S_i(t)$ 为状态 $i$ 持续时间的生存函数。

对于半马尔可夫过程中的转移概率，本研究基于文献[20]提出的方法来分析多状态情况下（优、良、中、次、差）机场道面性能退化过程的转移概率。

考虑到机场道面性能退化过程为半马尔可夫随机过程，在 $t=0$ 时刻之前，道面在状态 $i$ 持续的时间用 $t_0$ 表示，其下一个可能转移的目标状态为状态 $j$，并且系统历经中间状态 $k$。其中时间 $t_0$ 为道面在状态 $i$ 条件下，道面的使用年数（用 Age 表示）。

对于半马尔可夫链，其转移概率方程为

$$P_{ij}(t) = \begin{cases} S_i(t), & i = j \\ \sum_k \sum_{x=1}^{t} f_{ik}(x) P_{kj}(t-x), & i \neq j \end{cases} \tag{11}$$

式中：$k$ 为状态 $i$、$j$ 之间的中间状态；$f_{ik}(x)$ 为 $t_0$ 时间开始，$x$ 时刻发生第一次转移时状态 $i$ 的持续时间概率密度函数；$P_{kj}(t-x)$ 是在剩余时间 $(t-x)$ 内从状态 $k$ 转移到状态 $j$ 的概率，可利用式（10）计算。

在系统进入状态 $k$ 的条件下，在下一个时间间隔 $\Delta = t - x$ 内，状态 $k$ 将要转移为状态 $j$ 的概率可以用状态 $j$ 转移发生之前的状态 $k$ 的持续时间累积分布函数 $F_{kj}(t)$ 计算。将 $t=0$，$\Delta = t - x$ 代入式（11），可得到

$$P_{ij}(t) = \sum_k \sum_{x=1}^{t} f_{ik}(x) \frac{F_{kj}(t-x) - F_{kj}(0)}{1 - F_{kj}(0)}, \quad j = k+1 \tag{12}$$

### 1.3 概率型退化过程的更新方法

为了解决传统回归模型更新方法的缺点，目前发展了一种更新模型参数的贝叶斯（Bayesian）统计方法。近年来，许多研究者应用贝叶斯方法对基础设施性能退化模型的参数进行了更新[21]。

因为机场道面性能退化过程的危险率随使用时间的增长逐渐增加，所以机场跑道的性能退化可以采用式（7）表示的危险率函数 $\lambda(t)$，并采用生存分析的参数模型方法求出危险率函数 $\lambda(t)$ 的参数方程，利用 1.2 节所述的方法求出任意时刻 $t$ 和任意周期 $\Delta$（本研究采用机场道面定期检测周期 5 年）的状态转移概率数值，然后根据式（2）预测道面使用性能任意时刻各状态的分布概率。

生存分析利用机场道面定期检测数据样本组成的历史数据集进行分析，得出各状态的转移概率，对此模型进行分析评价。

然后，将新收集的不定期检测数据添加到历史数据中，并使用 MCMC[21] 对生存分析参数模型进行仿真并估计结果。当模型结果更新后，采用贝叶斯生存分析参数模型得到的结果预测机场道面的性能退化。最后，将生存分析参数模型的结果与基于 MCMC 仿真的后验估计结果进行比较，从而评价贝叶斯更新方法的效果。

## 2 机场道面数据的准备

机场道面历史数据是建立机场道面性能退化预估模型的基础，近年来，我国已积累了近 60 多个民用机场的道面 PCI 测试数据，这些数据一方面能够代表我国民用机场道面的性能状况，另一方面也能代表道面性能现场测试数据的典型特征。本研究以两组不同特点的机场道面测试历史数据为数据源，数据集 1 是我国民用机场道面 PCI 现场测试历史数据集，数据集 2 是某民航机场跑道 2007 年～2017 年现场测试数据集。其中数据集 1 的特点和详细信息参见文献[22]。这里只对数据集 2 进行简要介绍。

数据集 2 是某民航机场 2007 年、2013 年和 2017 年南飞行区跑道、滑行道道面的检测时间序列数据。该机场于 1997 年建成通航，至今其南飞行区道面已使用 23 年，已接近设计使用寿命。为了全面掌握南飞行区道面综合情况，机场管理部门于 2007 年、2013 年和 2017 年分别对机场南飞行区跑道、滑行道和联络道道面进行了全面检测，并对现场检测数据进行了综合分析，形成了具有较高价值

的数据库。

表 1　机场道面历史数据内容简表

Tab. 1 Summary table of airport pavement history data set content

| 组号 | 数据来源 | 等级优的持续时间/年 | 删失 | 使用年数/年 | 飞行交通量 | 厚度/cm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 10 | 1 | 8 | 35 934 | 34 |
| 2 | 1 | 10 | 0 | 8 | 35 934 | 32 |
| 3 | 1 | 12 | 0 | 12 | 5 132 | 27 |
| 4 | 1 | 12 | 1 | 10 | 71 236 | 38 |
| 20 | 2 | 12 | 0 | 12 | 74 325 | 38 |
| 21 | 2 | 10 | 1 | 8 | 74 325 | 38 |
| 33 | 2 | 14 | 1 | 12 | 74 325 | 34 |
| 34 | 2 | 12 | 0 | 12 | 74 325 | 34 |

本研究采用《民用机场道面评价技术管理规范》(MH/T5024－2019)的方法以道面评价区域的“道面状况指数 PCI 平均值”来评定道面表观状况等级,具体等级划分:PCI≥85 为优;70≤PCI＜85 为良;55≤PCI＜70 为中;40≤PCI＜55 为次;PCI＜40 为差。数据中,道面个体样本所处等级为优、良、中、次 4 种状态(其差状态等级为退化过程的结束状态),因此本研究主要对这 4 种状态进行分析,估计持续时间模型并计算其转移概率。

在生存分析中,感兴趣的因变量是道面在给定条件下维持某种等级状态的时间。这个变量定义为状态时间(time-in-state,TIS)。对于 TIS 观测值为右删失[17]的道面,由于其进入当前状态等级的时间未知,只知道发生在检测开始时间之前的某个时间。为了方便分析,对于右删失的道面个体的使用年数采用检测时刻的年数近似作为进入当前状态等级的使用年数。按照上述方法,最后得到 107 组机场道面的生存分析数据,如表 1 所示(只显示部分样本)。其中第 1～16 组样本为数据集 1,涵盖的机场刚性道面厚度范围为 18 cm～40 cm,基本覆盖了我国不同等级民用机场道面结构设计厚度,飞行交通量范围为 100～71 236,使用年限范围为 15 年～23 年。第 17～107 组样本为数据集 2,数据集 2 是某民航机场 2007 年、2013 年和 2017 年南飞行区跑道、滑行道道面的检测数据,刚性道面厚度为 34 cm(跑道中部)、38 cm(跑道两端和滑行道),飞行交通量为74 325,使用年限为 19 年。

表 1 中删失与否(censor),其中“1”表示右删失,“0”表示状态转移发生。使用年数是从最近一次道面大修或者建成投入使用时为起点直至退化到当前状态的时间。飞行交通量为当前状态转移时机场运行的主要机型的累积换算架次。厚度为道面水泥混凝土面层厚度,单位为 cm。

## 3　结果分析

### 3.1　半马尔可夫过程模型结果

根据文献[23]以及前文的分析,具体的影响因素考虑飞行交通量、道面厚度和使用年数三者,其中飞行交通量采用当前状态转移时机场运行的主要机型的累积换算架次的对数值。危险率函数表达为

$$\begin{cases}\lambda(t)=p\lambda^{p}t^{p-1}\\ \ln\lambda=\beta_1+\beta_2\lg N+\beta_3 H+\beta_4\mathrm{Age}\end{cases}\tag{13}$$

式中:$\beta_i$为影响因素的待估计系数;Age 为使用年数,是从最近一次道面大修或者建成投入使用时为起点直至退化到当前状态的时间;$\lg N$ 为飞行交通量的对数值;$H$ 为机场道面面层混凝土厚度,单位为 cm。

4 种状态(优、良、中、次)等级的持续时间函数参数估计的结果如表 2 所示。表 2 中的系数估算值均在显著性水平 0.05 上具有统计学意义;“ * * ”表示系数估算值没有显著的统计学意义;括号内的数值为显著性水平 0.1 的边际显著卡方统计值;$p$ 为威布尔分布函数的形状参数。

从表 2 参数估计可以得出,除了状态等级 2(良)的使用年数 Age 具有显著统计意义外,其他状态等级的使用年数 Age 均没有显著的统计意义,其他所有影响因素的系数估计值的显著性水平均小于 0.1,这说明飞行交通量和道面厚度对于模型具有显著作用。状态等级 1(优)和状态等级 3(中)的飞行交通量 $\lg N$ 的系数估计值为负值,即飞行交通量和危险率为负相关,说明随着飞行交通量的增加,危险率逐渐增加。换言之,当飞机的起降架次增加时,飞机荷载作用在机场道面的频率增加,在飞机荷载的重复作用下,机场跑道结构的应力会出现累积,当达到一定数值后,会引起机场道面板在应力薄弱部位产生裂缝,进一步引起 PCI 数值的减小,则机场道面维持当前状态等级的概率减小,从而机场道面维持当前状态等级的持续时间 TIS 的危险增加,其转移到下一状态等级的概率增大。

另外,状态等级优和中的道面厚度 $H$ 的系数估计值为正值,即道面厚度和危险率为正相关,说明随着道面厚度的增大,危险率逐渐减小。换言之,随着

机场道面厚度的增大,机场跑道结构的刚度增大,其结构性承载力增强,能够承担的飞机荷载作用等级以及作用频次也相应增加,机场道面维持当前状态等级的概率增大,从而维持当前状态等级的持续时间 TIS 的危险越小,其转移到下一状态等级的概率也越小。

对于状态等级良的系数估计值,除了截距系数 $\beta_1$ 和道面厚度 $H$ 的斜率系数 $\beta_3$ 显著性水平为边际显著(显著水平 0.10)外,其他影响因素的系数估计值的显著性水平均小于 0.05,这说明模型考虑的变量具有显著的作用。由于飞行交通量 $\lg N$ 的估计系数为正值,与状态 1 的估计值(负值)正负性相反,这并不能说明对于机场道面状态等级 2 的性能退化过程和状态等级 1 的退化过程的影响因素不同,而可能是由于其他解释变量(比如使用年数)的内在影响作用掩盖了飞行交通量 $\lg N$ 的作用。

此外,对于状态等级次的系数估计值,飞行交通量 $\lg N$ 的系数 $\beta_2$ 为正值,道面厚度 $H$ 的系数 $\beta_3$ 为负值,这和状态等级 1 或 3 的相应系数正负正好相反。这些现象并不能说明飞行交通量和道面厚度对于状态等级 4(次等)持续时间的影响和其他的状态等级是相反作用。分析本研究所采用的数据集可以发现,机场道面在退化状态等级为次等时,其 PCI 数值小于 55,这说明机场道面的功能性表观状况已经影响到机场道面的内在结构物理性能(应力、应变等),此时机场道面性能退化过程不只与飞行交通量、道面厚度有关,还与其他影响因素(比如环境温度、湿度、道面材料、跑道结构组成等)有关系。至于这些影响因素的作用规律如何,是下一步需要研究的内容。

道面退化过程的初始时刻记为 $t_0$,道面性能的初始分布向量为 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}(t_0)=(a_{01},a_{02},\cdots,a_{05})$,$\sum_i a_{0i}=1$;其中 $a_{0i}$ 是机场道面在 $t_0$ 时刻处于状态 $i$ 的概率,$i=1,2,\cdots,5$。由 Chapman-Kolmogorov 等式可得到任意 $t$ 时刻状态的转移矩阵 $\boldsymbol{P}$ 等于初始分布向量 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}(t_0)$ 与预测转移概率矩阵 $\boldsymbol{P}_{ij}(t)$ 的乘积即 $\boldsymbol{P}=\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}(t)=\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}(t_0)\boldsymbol{P}_{ij}(t)$。根据《民用机场道面评价技术管理规范》的状态评价等级 PCI 数值向量 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{CI}}{}^{\mathrm{T}}=(100\sim85,85\sim70,70\sim55,55\sim40,40\sim0)$ 可以得出 $t$ 时间后机场道面的 PCI 预测值为 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{CI}}(t)=\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}(t)\times\boldsymbol{P}_{\mathrm{CI}}$。

取初始状态向量 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}(t_0)=(10\,000)$,分别以数据集中第 8 组数据和第 22 组数据作为分析案例,应用半马尔可夫过程模型得到各年的状态转移概率矩阵,计算得到该组道面的使用性能概率预测结果。其中第 8 组样本的转移概率矩阵图见图 1 和图 2 所示(其中“$P_{ij}$”表示第 8 组样本的模型状态 $i$ 转移到状态 $j$ 的概率)。两组道面的使用性能预测结果如图 3 所示。图 3 中,蓝色实线代表机场道面 PCI 值状态区间中值预测曲线,上下虚线分别为 PCI 上限值和下限值预测曲线,带三角标志的点划线为机场道面 PCI 实测值;“Data1S08”表示数据集 1 中的第 8 组样本,其他编号类似。

**表 2 状态持续时间威布尔函数参数估计值**

Tab. 2 Parameter estimate of Weibull function of state duration

| 系数 | 优(1) | | 良(2) | | 中(3) | | 次(4) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 估算值 | 标准误差 | 估算值 | 标准误差 | 估算值 | 标准误差 | 估算值 | 标准误差 |
| $\beta_1$ | 2.93 | $3.25\times10^{-1}$ | $2.96\times10^{-1}$(2.65) | $1.82\times10^{-1}$ | 1.03 | $1.91\times10^{-1}$ | 3.26 | $2.66\times10^{-1}$ |
| $\beta_2$ | $-1.83\times10^{-1}$ | $8.28\times10^{-2}$ | $2.38\times10^{-1}$ | $5.16\times10^{-2}$ | $-1.75\times10^{-1}$ | $5.90\times10^{-2}$ | $3.90\times10^{-1}$ | $9.97\times10^{-2}$ |
| $\beta_3$ | $2.21\times10^{-2}$ | $1.08\times10^{-2}$ | $1.63\times10^{-2}$(3.04) | $9.30\times10^{-3}$ | $9.59\times10^{-2}$ | $9.10\times10^{-3}$ | $-6.96\times10^{-2}$ | $1.25\times10^{-2}$ |
| $\beta_4$ | * * | * * | $2.96\times10^{-2}$ | $7.90\times10^{-3}$ | * * | * * | * * | * * |
| $1/p$ | $1.18\times10^{-1}$ | $1.86\times10^{-2}$ | $1.15\times10^{-1}$ | $1.18\times10^{-2}$ | $1.23\times10^{-1}$ | $1.32\times10^{-2}$ | $2.19\times10^{-1}$ | $2.24\times10^{-2}$ |
| $p$ | 8.50 | 1.34 | 8.72 | $8.94\times10^{-1}$ | 8.15 | $8.79\times10^{-1}$ | 4.57 | $4.69\times10^{-1}$ |

由图 3 可知,实测道面 PCI 数据基本均分布在模型预测曲线的预测区间之内,这说明半马尔可夫过程模型对于两组(第 8 组和第 22 组)道面 PCI 数据均能较好的拟合。另外从图 3(a)和图 3(b)的比较可以得出:半马尔可夫模型对于机场道面性能退化过程的预测曲线,在退化过程前期,预测区间的上限接近实测值,而在退化过程中期和后期,预测区间的中值接近实测值;即半马尔可夫过程模型对于机场道面退化过程的状态等级 3~5(中~差)的持续时间预测效果要好于状态等级 1(优)或 2(良)。主要原因

可能和道面性能退化的力学特点有关,在道面使用的前期,由于使用时间较短,飞机荷载作用次数较少,道面的结构性承载能力基本维持在设计水平,保持在优良等级的概率比较大,从而其 PCI 数值基本维持在高位水平。但是在道面使用的中后期,由于使用时间的增加,飞机荷载作用次数的累积,道面的结构性承载能力逐渐被消耗,道面使用状态等级转移的概率增大,从而其 PCI 数值更接近于中低位水平。

从状态等级持续时间上分析,半马尔可夫过程模型对于机场道面 PCI 退化到 50(第 8 组道面)或退化到 70(第 22 组道面)的持续时间的预测值均较实际值大(预测曲线均在实测值曲线的右侧),这说明半马尔可夫过程模型对于机场道面退化过程的预测相对保守,这和半马尔可夫过程模型考虑了飞行交通量和道面厚度的影响因素、从而使预测数据能较好地反映实际的道面性能退化过程有一定关系。

### 3.2 机场道面性能退化模型的更新结果

如果马尔可夫链具有遍历性且数据链足够长,则待估参数后验分布将会接近于其真实分布。一般情况下,待估参数的先验分布可以任意选择。然而,为了获得贝叶斯分析的良好收敛性能,则要求先验分布的选择形式应接近于参数的后验分布[24]。因此,本节采用的 MCMC 的贝叶斯分析模型,根据 3.1 节中生存分析参数模型的估计结果表 2 设置先验分布。此外,本研究假设待估的先验分布是单变量正态分布。

为了验证本研究所提出的 MCMC 贝叶斯模型的精度和有效性,将新收集的 91 组机场道面性能数据样本加入到历史数据中。根据表 2 的参数估计结果,确定式(13)待估参数 $\beta_i$ 的先验分布为正态概率分布,形状参数 $p$ 的先验分布为伽马分布。

由于机场道面性能退化过程是五状态空间的半马尔可夫链,所以采用贝叶斯理论更新模型针对 5 个状态(优、良、中、次、差)分别分析。根据表2 中数据和新增加的机场道面性能检测数据,确定各个参数的先验分布,如表 3 所示。表中 $N(3,0.3)$ 表示均值为 3、标准差为 0.3 的正态分布;$G(0.02,0.01)$ 表示尺度参数 0.02、形状参数 0.01 的伽玛分布。



**表 3 MCMC 方法贝叶斯更新后的模型参数值**

Tab. 3 Model parameter values updated by using Bayesian approach with MCMC method

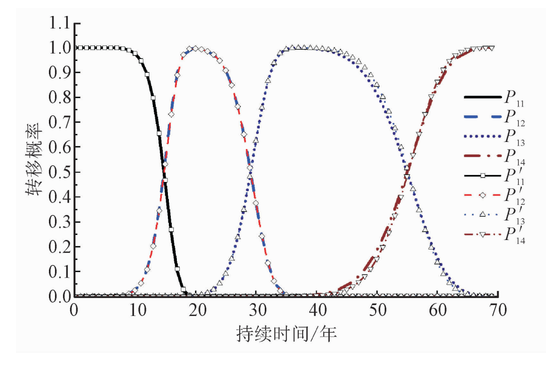
| 系数 | 先验分布 | 估计值 | 标准差 | 马尔可夫标准误差 | 95% 置信区间 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 下限 | 上限 |
| 状态 1(优) | | | | | | |
| $\beta_1$ | $N(3,0.3)$ | 2.96 | 0.19 | 0.005 40 | 2.62 | 3.37 |
| $\beta_2$ | $N(-0.2,0.08)$ | −0.17 | 0.048 | 0.001 91 | −0.27 | −0.07 |
| $\beta_3$ | $N(0.01,0.01)$ | 0.017 | 0.006 | 0.000 22 | 0.004 | 0.029 |
| $p$ | $G(8,0.8)$ | 8.64 | 1.18 | 0.039 1 | 6.48 | 11.16 |
| 状态 2(良) | | | | | | |
| $\beta_1$ | $N(0.3,0.2)$ | 0.32 | 0.133 | 0.004 2 | 0.068 | 0.59 |
| $\beta_2$ | $N(0.2,0.05)$ | 0.22 | 0.035 | 0.001 5 | 0.15 | 0.29 |
| $\beta_3$ | $N(0.02,0.01)$ | 0.02 | 0.005 9 | 0.000 28 | 0.009 | 0.031 |
| $\beta_4$ | $N(0.02,0.01)$ | 0.027 | 0.005 8 | 0.000 18 | 0.016 | 0.038 |
| $p$ | $G(8,0.8)$ | 8.59 | 0.85 | 0.028 | 6.91 | 10.22 |
| 状态 3(中) | | | | | | |
| $\beta_1$ | $N(0.5,0.1)$ | 0.62 | 0.078 | 0.002 4 | 0.47 | 0.77 |
| $\beta_2$ | $N(-0.2,0.06)$ | −0.17 | 0.038 | 0.001 6 | −0.24 | −0.096 |
| $\beta_3$ | $N(0.1,0.001)$ | 0.099 | 0.005 5 | 0.000 23 | 0.088 | 0.11 |
| $p$ | $G(8,2)$ | 6.76 | 0.67 | 0.02 | 5.43 | 8.09 |
| 状态 4(次) | | | | | | |
| $\beta_1$ | $N(3,0.3)$ | 3.36 | 0.185 | 0.005 8 | 3.00 | 3.73 |
| $\beta_2$ | $N(0.4,0.08)$ | 0.45 | 0.047 | 0.001 6 | 0.36 | 0.54 |
| $\beta_3$ | $N(-0.1,0.01)$ | −0.083 | 0.006 9 | 0.000 22 | −0.097 | −0.069 |
| $p$ | $G(4,1)$ | 4.28 | 0.43 | 0.0145 | 3.48 | 5.17 |

根据上述待估参数的先验分布,采用 MCMC 的贝叶斯更新后的模型参数值也示于表 3 中。MCMC 分析时选取抽样迭代 10 000 次。由表 3 中的数据可以看出,采用 MCMC 抽样的贝叶斯更新模型的参数估计值的标准误差均比表 2 中未更新模型相应的参数的标准误差要小,而且 MCMC 分析迭代轨迹很快稳定在样本的均值,参数的自相关性很快消失,这证明 MCMC 分析过程是稳定收敛的,抽样结果是有效的。另外通过 MCMC 标准误差(MCSE)的数值来看,所有参数估计值的 MCSE 数值均小于标注误差的 5%,这也说明通过 MCMC 抽样算法的贝叶斯更新方法对机场道面性能退化过程的威布尔分布生存分析模型的参数估计的后验分布接近于其真实的分布。

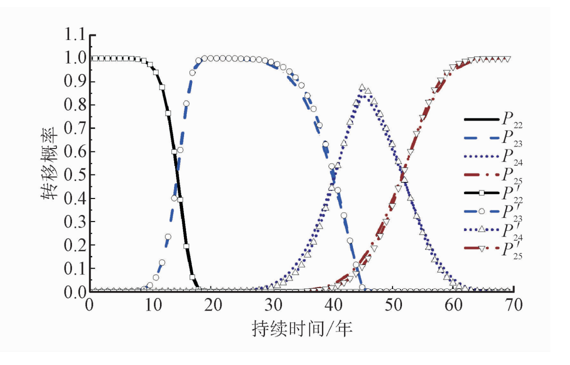
下文采用新模型的参数分别计算出机场道面性能退化过程的 5 个状态的转移概率,融合新旧刚性道面数据,采用 1 年的检测时间间隔,计算出机场道面样本均值性能退化过程的转移概率矩阵,分别作出状态 1 ~ 状态 4 的转移概率和状态持续时间的关系图,如图 1 ~ 图 2 所示。为了方便比较,将新、旧模型的转移概率一起表示在图中,其中“$P_{ij}$”表示新模型状态 $i$ 转移到状态 $j$ 的概率,“$P'_{ij}$”表示旧模型状态 $i$ 转移到状态 $j$ 的概率。

从图 1 ~ 图 2 可以看出:新模型的状态转移概率相比旧模型的状态转移概率的变化趋势在不同状态等级表现出显著的不同;状态 1→状态 2、状态 4→状态 5 的新旧模型转移概率数值变化不大,图形基本重合;状态 2→状态 3、状态 3→状态 4 的新旧模型转移概率数值变化较大,图形也表现出明显的不同。这些和新加入的机场道面 PCI 数据变化特点有直接关系,新加入的机场道面性能衰变过程对于机场道面衰变过程的初始状态和吸收状态影响较小,而对于机场道面性能衰变过程的中间状态则有较大影响。其主要原因可能和机场道面的使用性能特点有一定关系,新加入的机场道面样本的使用年限虽然已经接近使用寿命,但是由于机场运维部门对道面进行日常养护和维修,及时解决道面出现的表观病害和结构性损伤,从而使道面的使用性能得到了及时恢复,促使 PCI 数值也逐渐增大,新加入样本的性能衰变过程基本均处于中间状态,进而对机场道面性能衰变过程的中间状态产生了较大影响。





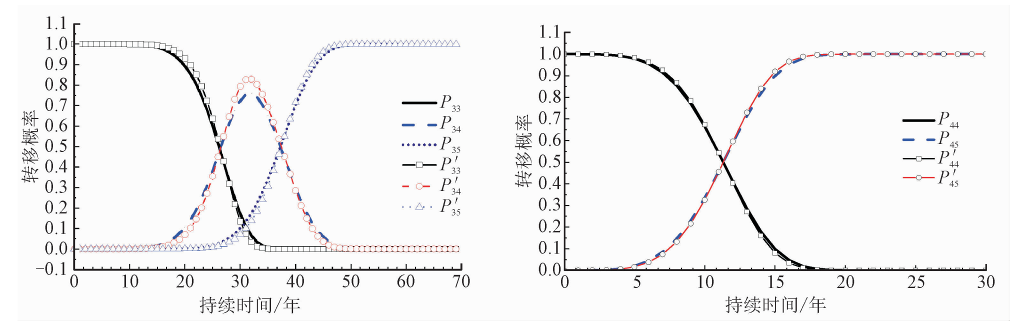

(a)状态 1 评价等级优




(b)状态 2 评价等级良

图 1 机场道面性能从状态 $i$(评价等级)开始后 $t$ 年的转移概率(状态 1、状态 2)

Fig. 1 The transition probability of airport pavement performance in $t$ years after the beginning of state $i$ (evaluation grade) (state 1, state 2)




(a)状态 3 评价等级中 (b)状态 4 评价等级次

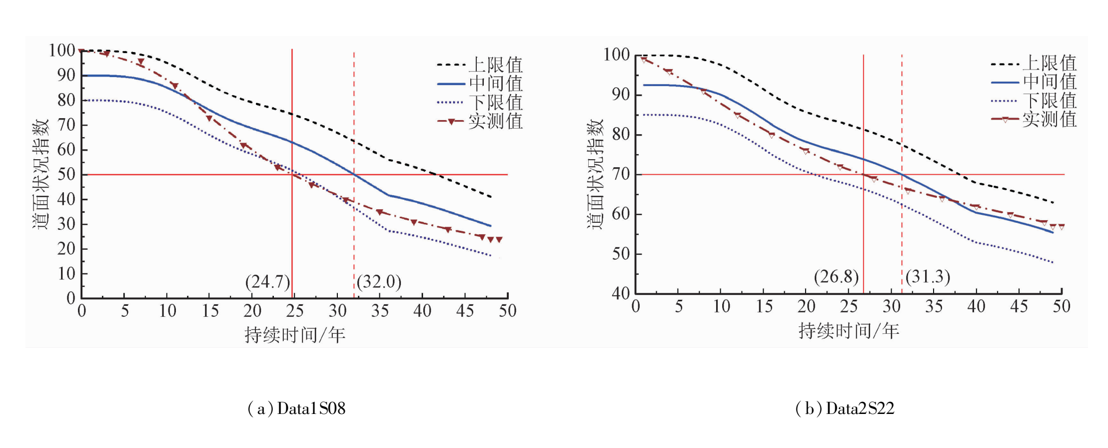
图 2 机场道面性能从状态 $i$(评价等级)开始后 $t$ 年的转移概率(状态 3、状态 4)

Fig. 2 The transition probability of airport pavement performance in $t$ years after the beginning of state $i$ (evaluation grade) (state 3, state 4)

按照第 1 节所述的方法,利用贝叶斯更新后的参数模型和半马尔可夫随机过程,求出机场道面任意状态等级在任意时间的转移概率矩阵 $\boldsymbol{P}_{ij}(t)$,利用转移概率矩阵来预测机场道面在任意时刻 $t$ 的状态或等级。为了对比新旧模型,仍然以数据集中第 8 组数据和第 22 组数据作为分析案例,得到该道面的使用性能概率预测结果。新模型两组道面的使用性能预测结果如图 4 所示。

分别对比图 4(a)和图 3(a)、图 4(b)和图 3(b),可以看出,新模型对于机场道面性能退化过程的 PCI 预测曲线更符合实测的 PCI 变化趋势线,并且新模型的预测区间基本都包含实测的 PCI 数值。从数值上来看,对于数据 Data1S08 机场道面实测 PCI 数值衰变到 50 的时间为 24.7 年,旧模型预测的该时间为 32 年,新模型预测的该时间为 26.4 年,预测的误差减小约 23%,这说明经过贝叶斯更新后的模型的预测精度有较显著提高,可信度有较显著增加;同理,对于数据 Data2S22 机场道面实测 PCI 数值衰变到 70 的时间为 26.8 年,旧模型预测的该时间为 31.3 年,新模型预测的该时间为 28.2 年,预测的误差减小约 12%。

对于预测曲线(PCI 值状态区间中值预测曲线)在早期和末期均偏离实测 PCI 数值,这可能和半马尔可夫过程的无后效性有一定关系,状态持续时间随机变量的概率密度分布不仅取决于当前状态,而且还和下一个状态相关。在 PCI 衰变早期,跑道的初始 PCI 数值的基本上都是 100,所以实测 PCI 数值曲线更接近于 PCI 预测曲线的上限。而在 PCI 衰变末期,由于缺少下一个状态的 PCI 数值(因为机场跑道的 PCI 数值一般小于 50 时,就需要进行维修养护),再加上机场跑道日常维修养护的作用,所以实测 PCI 数值曲线更接近于状态等级 PCI 数值区间的上限值。




(a) Data1S08　　　　(b) Data2S22

图 3　机场道面数据样本半马尔可夫模型 PCI 预测图

Fig. 3　Predicted PCI relative to time instate(years) for airport pavement data samples with semi-Markov model

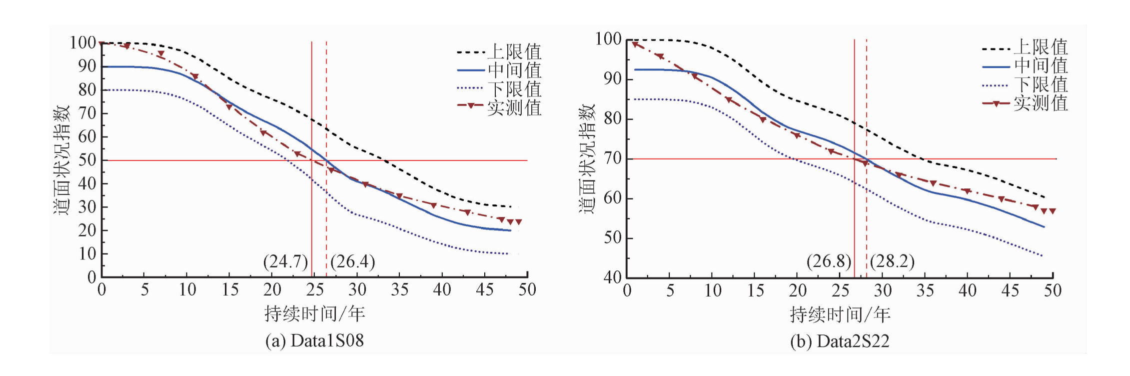



图 4　机场道面数据样本半马尔可夫模型 PCI 预测图(新模型)

Fig. 4　Predicted PCI relative to time in state(years) for airport pavement data samples with semi-Markov model(the new model)

1046(in Chinese)).

## 4 结　论

通过对两种机场道面性能检测数据的融合,集成了 107 组道面近 30 年的 PCI 数据来估计机场道面性能退化预测模型,通过分析,结论如下。

1)机场飞行交通量、机场道面结构面层混凝土厚度以及机场道面投入使用年限对退化过程的影响不同。随着飞机起降频次的增加,道面的损坏程度增大,PCI 数值减小,机场道面维持当前状态等级持续时间的危险越大。随着道面厚度的减小,道面结构承受荷载的能力下降,导致在相同飞行交通量水平下道面的损坏程度越大,进一步影响 PCI 值的减小,机场道面维持当前状态等级持续时间的危险越大。

而对于使用年限的作用,除了状态等级为良的退化过程模型,其他的状态等级均没有显著的统计学意义,这说明使用年限对于机场道面性能退化过程影响作用不明晰,这和半马尔可夫过程模型的无后效有关。

2)利用 MCMC 进行仿真,得到了更新后的模型估计结果,将更新后的半马尔可夫过程模型的预测结果与未更新的原始模型的预测结果进行比较,结果表明采用 MCMC 方法的贝叶斯分析技术是一种有效的更新先验信息的反分析方法,可以减小参数的不确定性,较显著提高预测结果的置信度,减小模型的预测误差。

3)通过随机选取数据样本进行对比分析,结果表明,更新后模型的状态转移概率相比原始模型的状态转移概率的变化趋势在不同状态等级表现出显著不同;新加入的机场道面性能衰变数据对于机场道面衰变过程的初始状态和结束状态影响较小,而对于机场道面性能衰变过程的中间状态则有较大影响。



## 参考文献

[1] 凌建明,袁捷,西绍波,等.上海机场道面管理系统研究与开发[J].同济大学学报(自然科学版),2005,33(8):1041-1046.(LING Jianming, YUAN Jie, XI Shaobo, et al. On development of shanghai airport pavement management system[J]. Journal of Tongji University(natural science edition),2005,33(8):1041-1046(in Chinese)).

[2] 刘锋,孙明清,王应军.基于 GIS 和有限元的机场道面健康监控系统研究[J].公路交通科技,2014,31(6):23-33.(LIU Feng, SUN Mingqing, WANG Yingjun. Research on health monitoring system of airport pavement based on GIS and FEM[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2014, 31(6):23-33(in Chinese)).

[3] 高金华.当代民航机场的管理与建设[J].交通运输工程学报,2002(2):106-109.(GAO Jinhua. Management and construction of present civil airports[J]. Journal of traffic and transportation engineering,2002(2):106-109(in Chinese)).

[4] 史保华,许巍,齐勇,等.机场沥青道面管理与预防性维护对策[J].交通运输工程学报,2008,8(2):74-79.(SHI Baohua, XU Wei, QI Yong. et al. Management and preventive maintenance countermeasures of airport asphalt pavement[J]. Journal of traffic and transportation engineering,2008,8(2):74-79(in Chinese)).

[5] 张献民,张润峰,刘亚,等.基于三维 GIS 的机场飞行区运行数字化管理系统[J].南京航空航天大学学报,2016,48(5):761-771.(ZHANG Xianmin, ZHANG Runfeng, LIU Ya, et al. Airfield area operation digital management system based on 3-D GIS[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2016, 48(5):761-771(in Chinese)).

[6] 凌建明,郑悦锋,金维明.机场道面评价体系研究[J].交通运输工程学报,2001,1(1):29-33.(LING Jianming, ZHENG Yuefeng, JIN Weiming. On airport pavement evaluation system[J]. Journal of traffic and transportation engineering,2001,1(1):29-33(in Chinese)).

[7] 周正峰,凌建明,袁捷.机场复合道面剩余寿命预估方法[J].交通运输工程学报,2007,7(6):54-58.(ZHOU Zhengfeng, LING Jianming, YUAN Jie. Prediction methods of remaining life for composite pavement of airport[J]. Journal of traffic and transportation engineering,2007,7(6):54-58(in Chinese)).

[8] SHAHIN M Y. Pavement management for airports, roads, and parking lots[J]. Canadian journal of civil engineering, 2005, 22(4):845-846.

[9] SHAHIN M Y, WALTHER J A. Pavement maintenance management for roads and streets using the PAVER system:M90/05[R]. Champaign: Army Construction Engineering Research Laboratory, 1990.

[10] Federal Aviation Administration. Airport pavement design and evaluation: advisory circular 150/5320-6F[S]. Washington DC: USA Department of Transportation,2016.

[11] Federal Aviation Administration. Airport pavement design for the Boeing-777 airplane: advisory circular 150/5320-16[S]. Washington DC: USA Department of Transportation,1995.

[12] 凌建明,郑悦锋. 机场水泥混凝土道面剩余寿命的预估方法[J]. 同济大学学报,2001,29(4):484-488.(LING Jianming, ZHENG Yuefeng. On prediction method of remaining life for cement concrete pavement of airport[J]. Journal of Tongji University (natural science),2001,29(4):484-488(in Chinese)).

[13] LYTTON R L. Concepts of pavement performance prediction and modeling[C]//Proceedings of the North American Conference on Managing Pavements. Toronto: Australian Road Research Board, 1987:3-19.

[14] HONG F, PROZZI J A. Estimation of pavement performance deterioration using Bayesian approach[J]. Journal of infrastructure systems,2006,12 (2):77-86.

[15] BLACK M, BRINT A T, BRAILSFORD J R. A semi-Markov approach for modelling asset deterioration[J]. Journal of the operational research society,2005,56(11):1241-1249.

[16] GOLABI K, KULKARNI R B, WAY G B. A statewide pavement management system[J]. Interfaces,1982,12(6):5-21.

[17] MISHALANI R G, MADANAT S. Computation of infrastructure transition probabilities using stochastic duration models[J]. Journal of infrastructure systems,2002,8(4):139-148.

[18] LAWLER G F. Introduction to stochastic processes[M]. New York: Houghton Mifflin Co,2006.

[19] KLEINBAUM D G, MITCHEL K. Survival analysis a self-learning text[M]. New York: Springer,2012.

[20] SOBAN J O. State transition probabilities in bridge deterioration based on weibull sojourn times[J]. Structure and infrastructure engineering,2011,7(10):747-764.

[21] ZHOU W H, TAN F, YUEN K V. Model updating and uncertainty analysis for creep behavior of soft soil[J]. Computers and geotechnics,2018,100(8):135-143.

[22] 袁捷,苏尔好,杜先照,等. 基于线性混合效应模型的道面使用性能预测[J]. 同济大学学报(自然科学版),2014,42(5):707-713.(YUAN Jie, SU Erhao, DU Xianzhao, et al. Linear mixed effect model for airport pavement performance prediction[J]. Journal of Tongji University (natural science),2014,42(5):707-713(in Chinese)).

[23] ORTIZ-GARCÍA J J, COSTELLO S B, SNAITH M S. Derivation of transition probability matrices for pavement deterioration modeling[J]. Journal of transportation engineering,2006,132(2):141-161.

[24] MICEVSKI T, KUCZERA G, COOMBES P. Markov model for storm water pipe deterioration[J]. Journal of infrastructure systems, 2002,8(2):49-56.

(编辑　张璐)